



**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS**

**DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E FÍSICA**

Professor: Renato Medeiros

**ENG 1550**

**Eletrônica Geral**

**Cap 04**

Goiânia 2019

A análise ou projeto de um amplificador com transistor exige o conhecimento das respostas dc e ac do sistema. O nível da potência de saída ac amplificado é o resultado da transferência de energia das fontes dc aplicadas.

Usando o teorema da superposição nesta análise podemos separar a configuração dc da ac e fazer o estudo separadamente.

Iremos usar as seguintes relações básicas importantes de um transistor:

$$V_{BE} = 0,7V$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B \cong I_C$$

$$I_C = \beta I_B$$

O termo *Polarização* significa a aplicação de tensões dc em um circuito para estabelecer valores fixos de corrente e tensão. Para amplificadores com transistor, a corrente e a tensão dc resultantes estabelecem um *ponto de operação* nas curvas que define a região empregada para a amplificação do sinal aplicado.

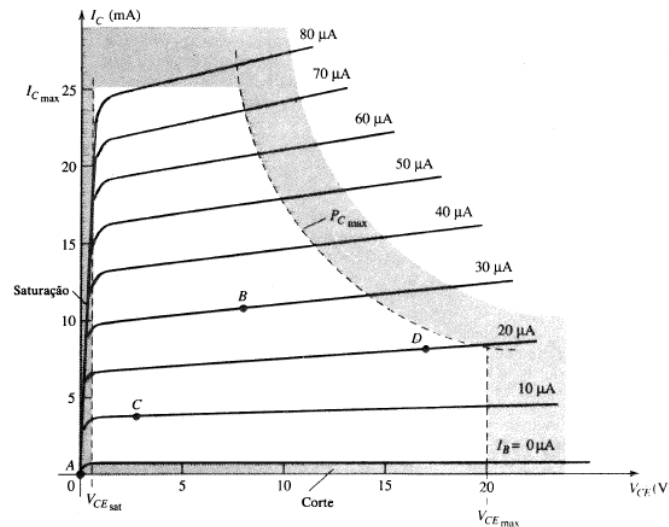


Fig. 4.1 Vários pontos de operação dentro dos limites de operação de um transistor.

Os TBJ's devem ser polarizados para operar fora dos limites máximos. Se isto não ocorrer, a vida útil do dispositivo será reduzida ou o dispositivo poderá ser danificado.

Para a polarização do TBJ em sua região de operação linear (ativa), as seguintes condições devem ser atendidas:

1. A junção base-emissor deve estar diretamente polarizada (região  $p$  com potencial maior), com uma tensão resultante de polarização de mais ou menos 0,6 a 0,7 V.
2. A junção base-coletor deve estar reversamente polarizada (região  $n$  com potencial maior), com a tensão reversa de polarização situando-se dentro dos limites máximos do dispositivo.

A operação no corte, saturação e regiões das curvas do TBJ são especificadas a seguir:

1. Operação na região linear:
  - a. Junção base-emissor diretamente polarizada
  - b. Junção base-coletor reversamente polarizada
2. Operação na região de corte:
  - a. Junção base-emissor reversamente polarizada
3. Operação na região de saturação:
  - a. Junção base-emissor diretamente polarizada
  - b. Junção base-coletor diretamente polarizada

### Circuito Com Polarização Fixa

O circuito abaixo serve com uma introdução relativamente simples e direta para a análise de uma polarização dc do transistor.

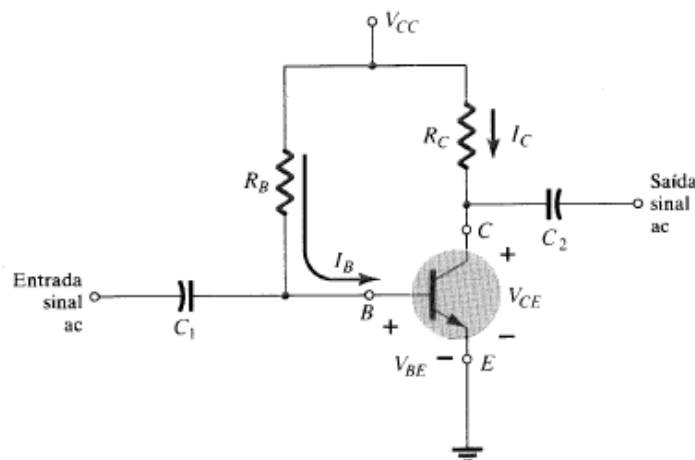


Fig. 4.2 Circuitos com polarização fixa.

Para a análise dc, o circuito pode ser isolado dos níveis ac indicados, substituindo-se os capacitores por um circuito-aberto equivalente. Além disso, a fonte dc pode se separada em duas fontes (somente na análise), como mostra a figura abaixo, isso permite uma separação entre os circuitos de entrada e saída.

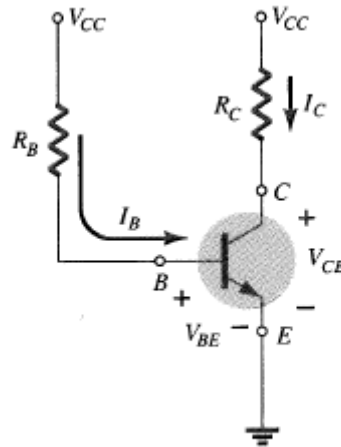


Fig. 4.3 Equivalente dc da Fig. 4.2.

### Polarização Direta da Junção Base-Emissor

Tomemos agora apenas a seguinte figura:

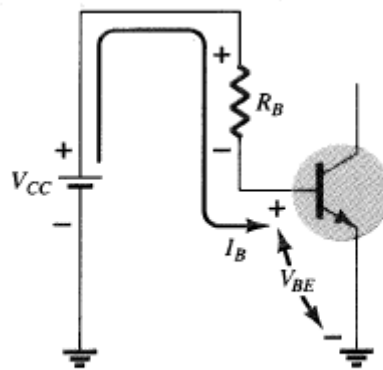


Fig. 4.4 Malha incluindo a junção base-emissor.

Iremos usar a Lei das Malhas para escrevermos

$$+V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

A escolha de um resistor de base ajusta o nível da corrente de base para o ponto de operação.

### Malha Coletor-Emissor

Tomemos agora o circuito:

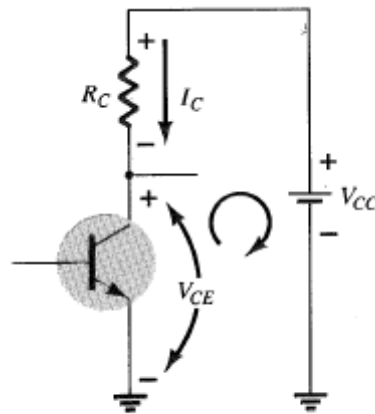


Fig. 4.5 Malha coletor-emissor.

O valor da corrente do coletor está diretamente relacionado à corrente na base por meio de:

$$I_C = \beta I_B$$

Observe que o valor da corrente no coletor não está diretamente ligado ao valor do  $R_C$ , e sim ao valor da corrente na base. Modificando o valor de  $R_C$ , teremos uma variação no valor da ddp entre o coletor e o emissor, que é um importante parâmetro.

Novamente aplicando a lei das malhas de Kirchhoff no sentido horário ao longo da malha, obtemos o seguinte:

$$+V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Lembrando que:  $V_{CE} = V_C - V_E$

Onde  $V_{CE}$  é a tensão do coletor para o emissor,  $V_C$  do coletor para o terra e  $V_E$  do emissor para o terra. Mas neste caso específico,  $V_E = 0V$ , com isso temos:

$$V_{CE} = V_C$$

Além disso, já que:

$$V_{BE} = V_B - V_E$$

Temos, também:

$$V_{BE} = V_B$$

Tenha em mente que os níveis de tensão são levantados na prática colocando-se a ponta vermelha (positiva) do voltímetro no coletor (ou na base), e a ponta preta (negativa) no emissor, como na figura abaixo:

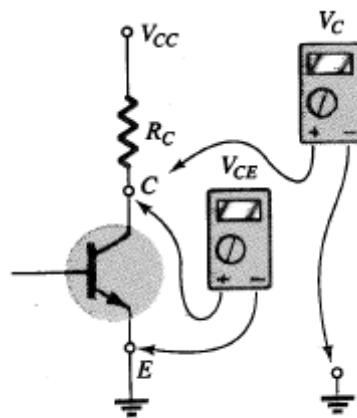
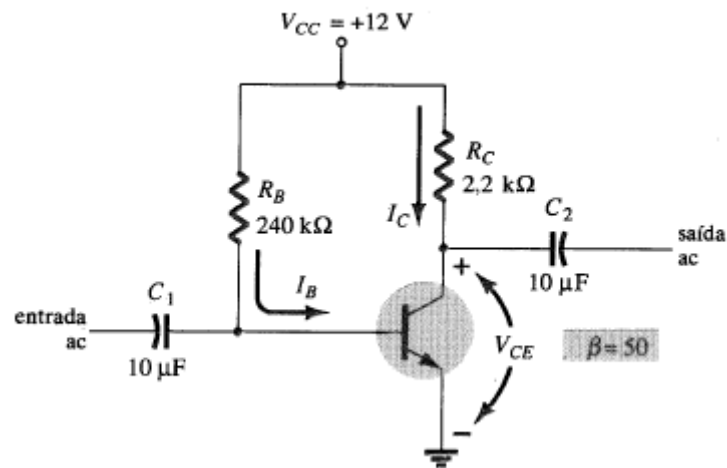


Fig. 4.6 Medição de  $V_{CE}$  e  $V_C$ .

## Exercício

1) Determine as seguintes quantidades para a configuração fixa da figura abaixo:

- $I_{Bq}$  e  $I_{Cq}$
- $V_{CEq}$
- $V_B$  e  $V_C$
- $V_{BC}$



a)

$$I_{Bq} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} = \frac{12 - 0,7}{240K} = \boxed{47,08\mu A}$$

$$I_{Cq} = \beta I_{Bq} = 50 \cdot 47,08\mu = \boxed{2,35mA}$$

b)

$$V_{CEq} = V_{CC} - I_C R_C = 12 - 2,35m \cdot 2,2k$$

$$\boxed{V_{CEq} = 6,83V}$$

c)

$$V_{BE} = V_B - V_E \Rightarrow 0,7 = V_B - 0 \Rightarrow \boxed{V_B = 0,7V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E \Rightarrow 6,83 = V_C - 0 \Rightarrow \boxed{V_C = 6,83V}$$

d)

$$V_{BC} = V_B - V_C \Rightarrow V_{BC} = 0,7 - 6,38 \Rightarrow \boxed{V_{BC} = -9,13V}$$

Observe o sinal negativo, revela que a junção esta reversamente polarizada, como deveria ser para a amplificação linear.

### **Saturação do Transistor**

O termo saturação é aplicado a qualquer sistema onde os níveis alcançam seus valores máximos. As condições para saturação são normalmente evitadas porque a junção base-coletor não está reversamente polarizada, e o sinal amplificado na saída estará distorcido.

A corrente de saturação reversa para a configuração com polarização fixa pode ser dada por:

$$I_{C_{SAT}} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

### **Exercício**

2) Determine o nível de saturação para o circuito do exercício 1.

$$I_{C_{SAT}} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{12}{2,2k} \quad I_{C_{SAT}} = 5,45mA$$

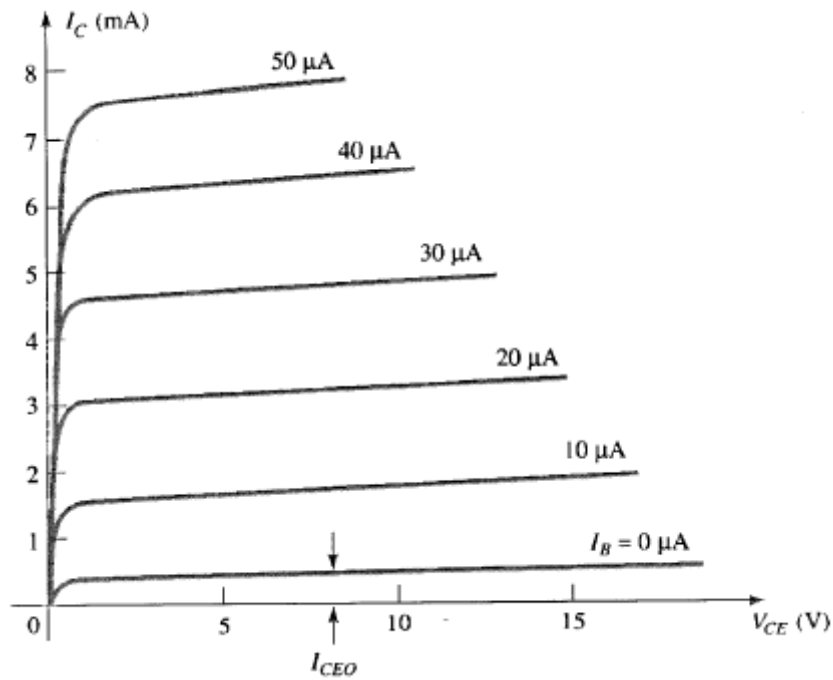
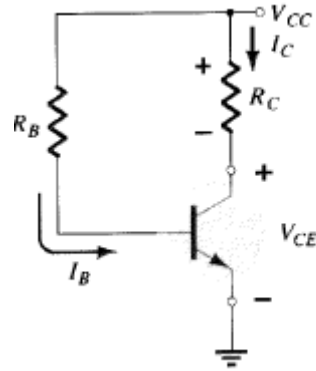
### **Análise por Reta de Carga**

Vamos investigar agora como os parâmetros do circuito determinam o conjunto possível de pontos Q, e como o ponto Q real é determinado. O circuito abaixo estabelece uma equação para a saída que relaciona a corrente no coletor com a ddp entre o coletor e o emissor da seguinte maneira:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

As curvas características de saída do transistor são dadas conforme a figura a baixo:





Para traçar a reta do circuito, fazemos  $I_C = 0$  e depois  $V_{CE} = 0$ . Com isso teremos dois pontos e poderemos traçar a reta de carga, ou seja

$$V_{CE} = V_{CC} - (0)R_C$$

$$\boxed{V_{CE} = V_{CC} \Big|_{I_C=0}}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \Rightarrow 0 = V_{CC} - I_C R_C$$

$$\boxed{I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \Big|_{V_{CE}=0}}$$

Ligando os dois pontos, a linha reta estabelecida pode ser desenhada:

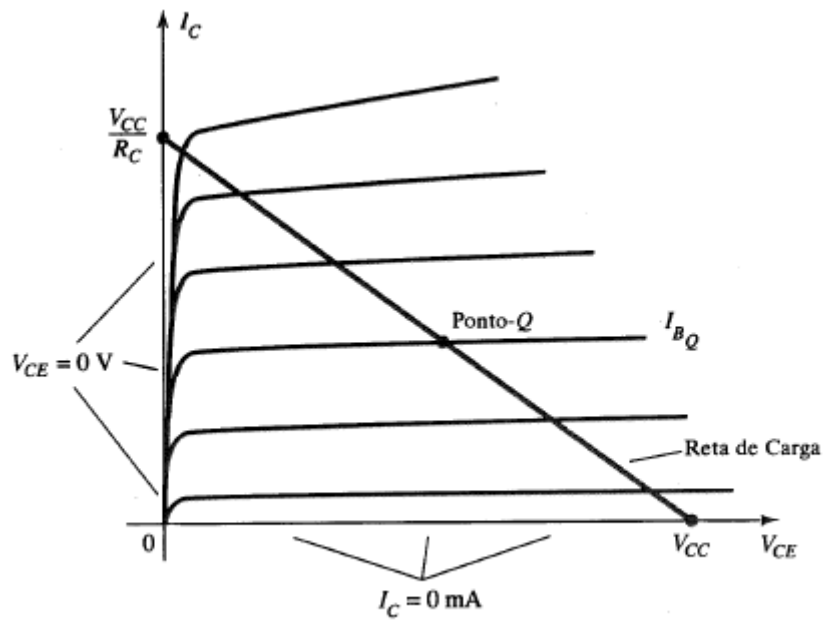
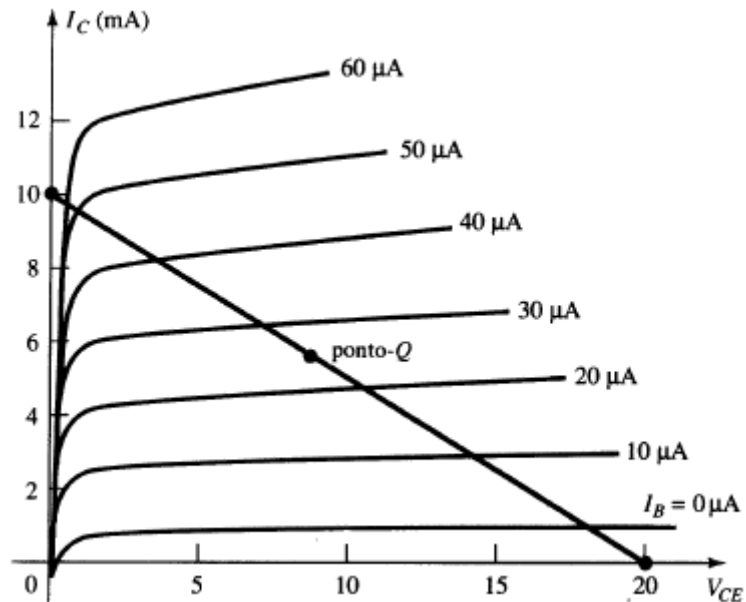


Fig. 4.12 Reta de carga para polarização fixa.

### Exercício

- 3) Dada a reta de carga abaixo e ponto Q definido, determine os valores exigidos de  $V_{CC}$ ,  $R_C$  e  $R_B$  para uma configuração fixa.



Da figura acima temos:

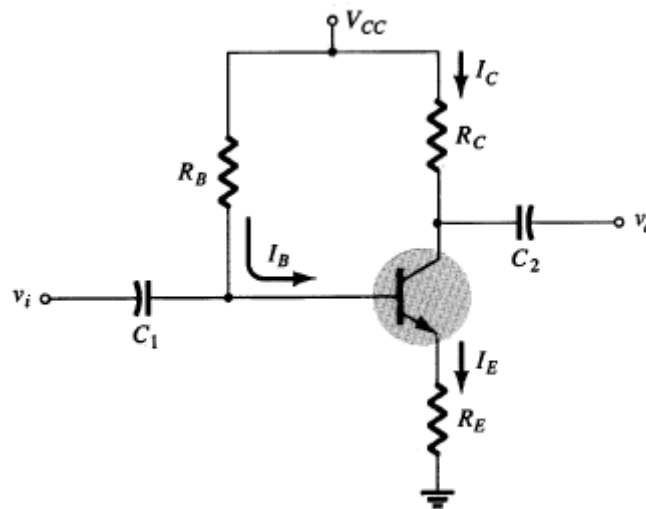
$$V_{CE} = V_{CC} = 20V$$

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \Rightarrow R_C = \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{20}{10m} = 2k\Omega$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \Rightarrow R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{20 - 0,7}{25\mu} = 772k\Omega$$

### Circuito de Polarização Estável do Emissor

No circuito abaixo colocamos um resistor no terminal do emissor para melhorar o nível de estabilidade da configuração fixa.



**Fig. 4.17** Circuito de polarização do TBJ com resistor de emissor.

Usando as regras de Kirchoff, podemos escrever a seguinte equação:

$$+V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

$$\text{Lembre-se que: } I_E = (\beta + 1) I_B$$

$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - (\beta + 1) I_B R_E = 0$$

$$V_{CC} - I_B (R_B + (\beta + 1) R_E) - V_{BE} = 0$$

$$I_B (R_B + (\beta + 1) R_E) + V_{BE} - V_{CC} = 0$$

$$I_B (R_B + (\beta + 1) R_E) = V_{CC} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{(R_B + (\beta + 1) R_E)}$$

## Malha Coletor-Emissor

Vamos redesenhar a malha coletor-emissor conforme a figura abaixo

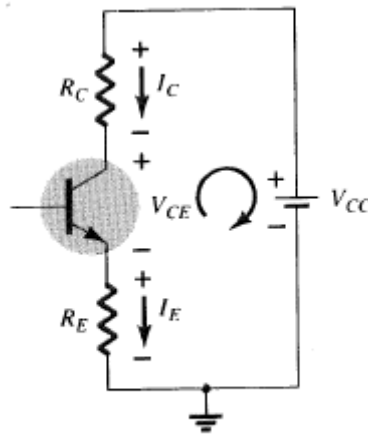


Fig. 4.21 Malha coletor-emissor.

Analisando o circuito temos:

$$I_E R_E + V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

$$\text{fazendo: } I_E \cong I_C$$

$$I_C R_E + V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

$$V_{CE} + I_C (R_C + R_E) - V_{CC} = 0$$

$$\boxed{V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)}$$

A notação  $V_E$  indica uma tensão do emissor para a terra, e pode ser determinada por:

$$\boxed{V_E = I_E R_E}$$

Enquanto que a tensão do coletor para a terra pode ser determinada de

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

$$\boxed{V_C = V_{CE} + V_E}$$

ou

$$\boxed{V_C = V_{CC} - I_C R_C}$$

A tensão na base em relação à terra pode ser determinada de

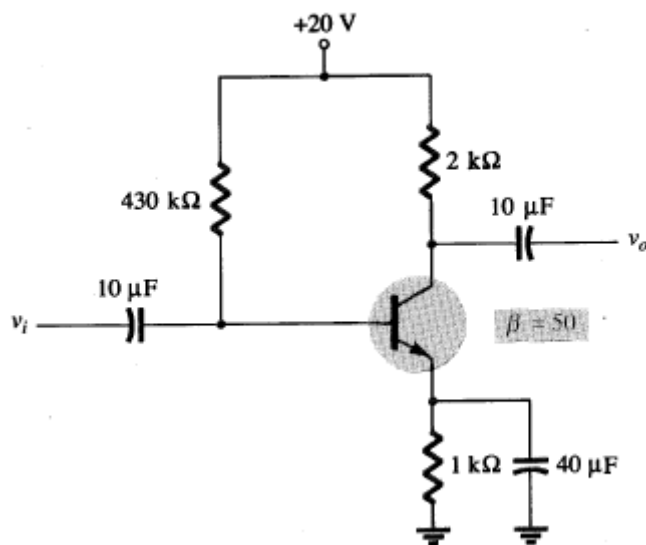
$$V_B = V_{CC} - I_B R_B$$

ou

$$V_B = V_{BE} + V_E$$

### Exercício

- 4) Para o circuito abaixo, determine as correntes na base e no coletor e as tensões entre o coletor e o emissor, no coletor, no emissor, na base e entre a base e o coletor.



$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{(R_B + (\beta + 1)R_E)} = \frac{20 - 0,7}{430k + (50 + 1)1k} = \boxed{40,1\mu A}$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \cdot 40,1\mu = \boxed{2,01mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 20 - 2,01m \cdot (2k + 1K) = \boxed{13,97V}$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 20 - 2,01m \cdot 2k = \boxed{15,98V}$$

$$V_E = V_C - V_{CE} = 15,98 - 13,97 = \boxed{2,01V}$$

$$V_B = V_{BE} + V_E = 0,7 + 2,01 = \boxed{2,71V}$$

$$V_{BC} = V_B - V_C = 2,71 - 15,98V = \boxed{-13,27V}$$

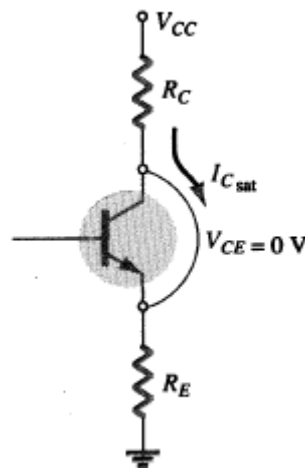
⇒ TENSÃO REVERSA, COMO PREVISTA.

### Melhoria na Estabilidade da Polarização

A inclusão do resistor de emissor ao circuito de polarização dc do TBJ proporciona uma melhoria na estabilidade do circuito; isto é, mesmo ocorrendo modificações externas (temperatura, beta do transistor), as correntes e tensões dc permanecem próximas aos valores previamente estabelecidos.

### Nível de Saturação

O nível de saturação do coletor ou corrente de coletor máxima em um projeto de polarização pode ser determinado, utilizando-se a mesma abordagem aplicada à configuração com polarização fixa: considere um curto-circuito entre os terminais de coletor e emissor, como mostrado na figura abaixo, e calcule a corrente de coletor resultante.



$$V_{CC} - I_{C_{SAT}} R_C - I_{C_{SAT}} R_E = 0$$

$$I_{C_{SAT}} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

### Exercício

5) Determine a corrente de saturação para o circuito do exercício 4..

$$I_{C_{SAT}} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{20}{2K + 1K} = \boxed{6,67mA}$$

### Análise por Reta de Carga

A equação para a malha coletor-emissor que define a reta de carga é a seguinte:

$$V_{CE} + I_C (R_C + R_E) - V_{CC} = 0$$

$$\text{para } I_C = 0mA$$

$$V_{CE} + 0 \cdot (R_C + R_E) - V_{CC} = 0$$

$$\boxed{V_{CE} = V_{CC} |_{I_C=0}}$$

Como obtido para a configuração com polarização fixa. Fazendo  $V_{CE} = 0$ , temos:

$$V_{CE} + I_C (R_C + R_E) - V_{CC} = 0$$

$$\text{para } V_{CE} = 0mA$$

$$0 + I_C \cdot (R_C + R_E) - V_{CC} = 0$$

$$\boxed{I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} |_{V_{CE}=0}}$$

### Polarização por Divisor de Tensão (PDT).

Nas polarizações anteriores a corrente e a ddp eram funções do ganho de corrente (beta). Entretanto ele é muito sensível à temperatura, e o valor exato de  $\beta$  normalmente não é bem definido. Seria então desejável desenvolver um circuito de polarização que seja menos vulnerável, ou seja, independente do beta do transistor.

O circuito mais usado na polarização do transistor é o chamado polarização por divisor de tensão (PDT). Este circuito é derivado do circuito de polarização do emissor. Algumas vezes, a tensão da fonte pode ser muito alta para ser aplicada diretamente na base. Para resolver esse problema, sem modificar a fonte, aplicamos um divisor de tensão

como mostrado na figura abaixo. Escolhendo adequadamente os valores de  $R_1$  e  $R_2$ , podemos diminuir a tensão para valores adequados ao nosso projeto.

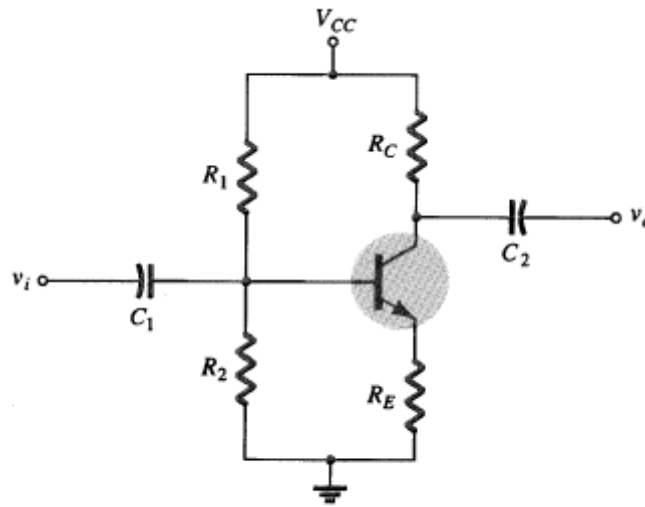


Fig. 4.25 Configuração de polarização por divisor de tensão.

Alguns circuitos eletrônicos têm apenas uma fonte simples, e não duas. Neste caso devemos projetar nosso circuito de maneira a utilizar somente esta única fonte. Mesmo o valor da tensão  $V_{CC}$  sendo muito grande, podemos trabalhar com quaisquer valores de  $R_1$  e  $R_2$  de modo a garantir que a tensão na base seja baixa o suficiente para não danificar nosso transistor.

### Análise Exata

O circuito acima pode ser redesenhado como mostra a figura abaixo para a análise dc. O circuito equivalente de Thèvenin para o circuito à esquerda do terminal da base pode ser determinado da seguinte maneira:

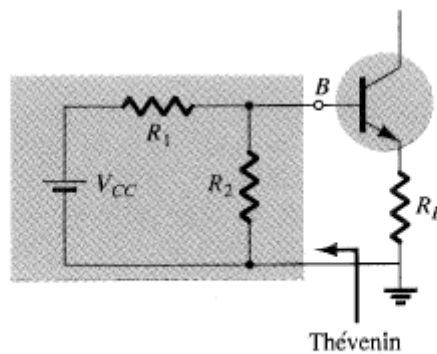


Fig. 4.27 Redesenhando o circuito de entrada da Fig. 4.25.



$R_{TH}$ : substitua a tensão por um curto-circuito e calcule a resistência em paralelo de  $R_1$  e  $R_2$

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

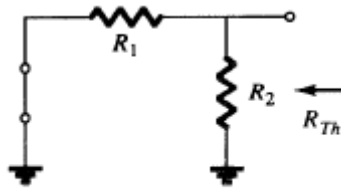
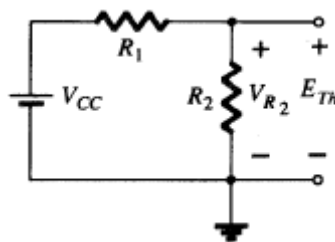


Fig. 4.28 Determinando  $R_{TH}$ .

$E_{TH}$ : Calculando a tensão sobre o resistor  $R_2$  do circuito abaixo:



Usando:

$$E_{TH} = V_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

Com esses valores podemos redesenhar o circuito e determinar a corrente na base aplicando-se as regras de Kirchhoff, no sentido horário, para a malha indicada:

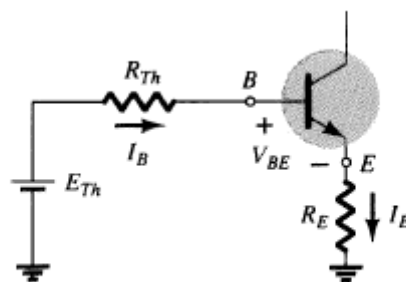


Fig. 4.30 Inserindo o circuito equivalente de Thévenin.

$$E_{TH} - I_B R_{TH} - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

Como:  $I_E = (\beta + 1)I_B$

$$E_{TH} - I_B R_{TH} - V_{BE} - [(\beta + 1)I_B] R_E = 0$$

$$I_B = \frac{E_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + [(\beta + 1)I_B] R_E}$$

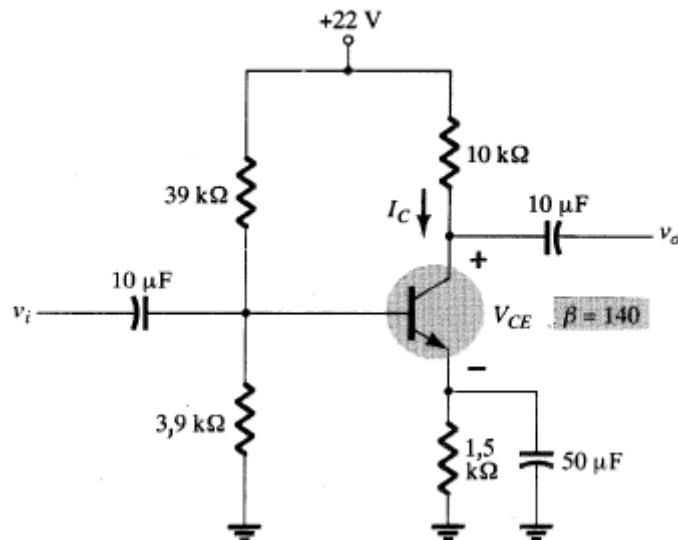
Uma vez encontrada a corrente na base, as outras grandezas podem ser determinadas da mesma forma que anteriormente.

Com isso podemos determinar a tensão entre o coletor e o emissor

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

### Exercício

- 6) Determine a tensão  $V_{CE}$  e a corrente  $I_C$  de polarização dc para a configuração do divisor de tensão do circuito abaixo.



$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{39k \cdot 3,9k}{39k + 3,9k} = \boxed{3,55k\Omega}$$

$$E_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{3,9k}{39k + 3,9k} 22 = \boxed{2V}$$

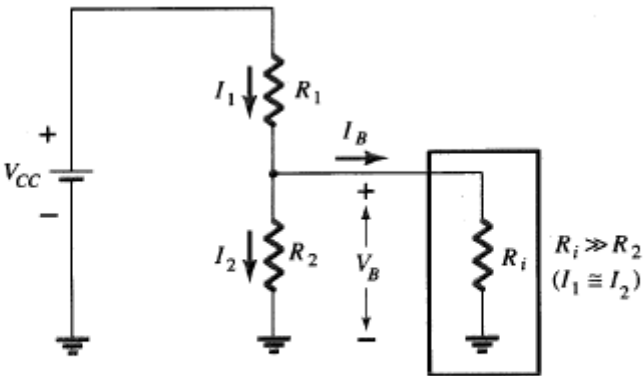
$$I_B = \frac{E_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) R_E} = \frac{2 - 0,7}{3,55k + (140 + 1)1,5k} = \boxed{6,05 \mu A}$$

$$I_C = \beta I_B = 140 \cdot 6,05 \mu = \boxed{0,85 mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 22 - 0,85m(10k + 1,5k) = \boxed{12,22V}$$

**Análise aproximada**

O processo de análise do circuito começa com o cálculo da tensão aplicada não base. Como temos a tensão aplicada em R<sub>2</sub> representada por V<sub>2</sub>, e temos esse resistor em paralelo com transistor, ou seja, R<sub>2</sub> está em paralelo com o terminal da base, podemos afirmar que a tensão aplicada na base é exatamente igual a tensão aplicada no resistor do divisor de tensão, V<sub>B</sub> = V<sub>2</sub>.



**Fig. 4.32** Circuito parcial de polarização para o cálculo da tensão aproximada de base V<sub>B</sub>.

No circuito acima podemos utilizar a malha do divisor de tensão e encontrar a seguinte relação com a ajuda da lei das malhas:

$$V_{CC} - R_1 I - R_2 (I - I_B) = 0$$

Onde I é a corrente total que passa pelo divisor de corrente e (I - I<sub>B</sub>) é a corrente que passa somente pelo resistor R<sub>2</sub>.

Aqui podemos fazer nossa primeira aproximação dos cálculos. Como estamos projetando, e sabemos que na eletrônica podemos trabalhar com uma margem de erro, podemos fazer a seguinte aproximação: se a corrente na base for 20 vezes menor que a corrente em  $R_2$  poderemos desprezar a corrente que passa pela base. É importante salientar que não estamos falando que a corrente na base seja nula (o que não é verdade) e sim a desprezando nos cálculos da tensão na base. Na equação acima temos, então,  $I_B \ll I$ , e com isso podemos escrever:

$$I = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

Essa é a lei de Ohm aplicada na resistência total do divisor de tensão.

Como sabemos que a tensão na base é igual a tensão aplicada a  $R_2$ , podemos usar a lei de ohm para encontrar a tensão na base, ou seja

$$V = RI$$

$$V_2 = R_2 I$$

$$V_B = R_2 I$$

Como estamos projetando devemos ter um pouco mais de cuidado, com isso estaremos agora usando a segunda aproximação, onde  $V_{BE} = 0,7 V$ .

### **A tensão e a corrente no emissor.**

O próximo passo é encontrar a tensão no emissor. Observando novamente o circuito podemos concluir que

$$V_{BE} = V_B - V_E$$

$$\boxed{V_E = V_B - V_{BE}}$$

Onde  $V_{BE}$  é a tensão entre a base e o emissor e é dada pelo valor da barreira de potencial que existe entre a base e o emissor.

Achada a tensão aplicada no emissor podemos encontrar, através da lei de Ohm, a corrente que passa pelo emissor, ou seja,

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

e

$$I_C \cong I_E$$

### **A tensão no coletor e a tensão no coletor-emissor.**

Agora podemos achar a tensão no coletor ( $V_C$ ) e entre o coletor e o emissor ( $V_{CE}$ ). Como já vimos anteriormente, temos:

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C .$$

Como a corrente no coletor é aproximadamente igual a corrente do emissor, podemos substituí-la pela corrente no emissor.

Com a tensão no coletor calculada, podemos calcular a tensão entre o coletor e o emissor, ou seja,

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

**Observe que na sequência dos cálculos beta não aparece, e IB não é calculada. O ponto Q é, portanto, independente do valor de beta.**

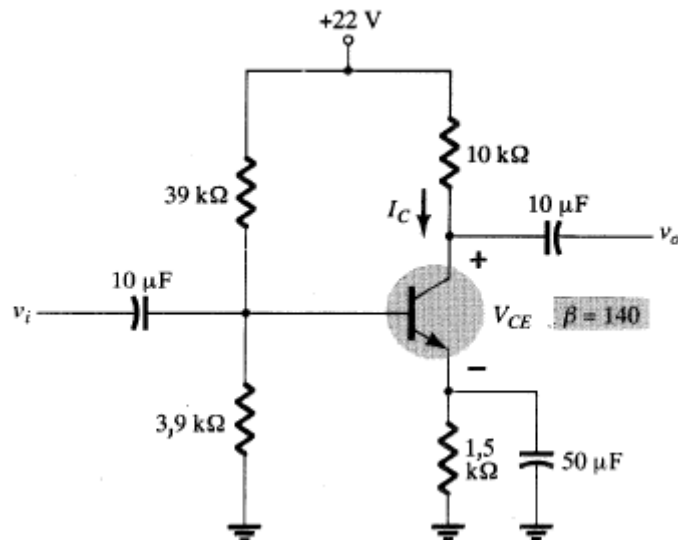
RESUMINDO, PARA PROJETAR UM PDT DEVEMOS SEUIR A SEGUINTE ORDEM:

- 1) Calcular a corrente no divisor
- 2) Calcular a tensão na base
- 3) Calcular a tensão no emissor
- 4) Calcular a corrente no emissor
- 5) Calcular a tensão no coletor
- 6) Calcular a tensão entre o coletor e o emissor

Com esses cálculos podemos projetar qualquer circuito PDT.

## Exercícios

- 7) Repita o exercício 6 usando a técnica aproximada e compare as soluções para  $I_C$  e  $V_{CE}$ .



$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{3,9k}{39k + 3,9k} 22 = \boxed{2V}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2 - 0,7 = \boxed{1,3V}$$

$$I_C \cong I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1,3}{1,5k} = \boxed{0,867mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 22 - 0,867m(10k + 1,5k) = \boxed{12,03V}$$

12,03V versus 12,22V

valores muito próximos, e portanto muito bem aceito.

- 8) Repita o exercício 6 para um  $\beta = 70$

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{39k \cdot 3,9k}{39k + 3,9k} = \boxed{3,55k\Omega}$$

$$E_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{3,9k}{39k + 3,9k} 22 = \boxed{2V}$$

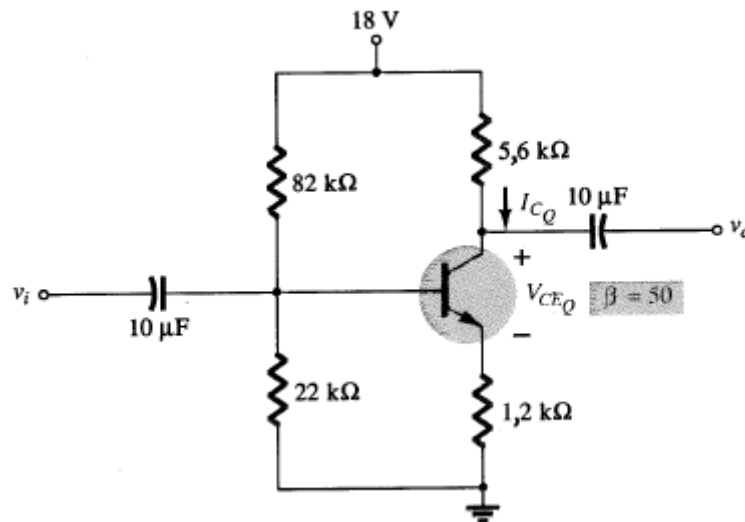
$$I_B = \frac{E_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) R_E} = \frac{2 - 0,7}{3,55k + (70 + 1)1,5k} = \boxed{11,81\mu A}$$

$$I_C = \beta I_B = 70 \cdot 11,81\mu = \boxed{0,83mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 22 - 0,83m(10k + 1,5k) = \boxed{12,46V}$$

Embora o beta tenha sido drasticamente reduzido (50% a menos) os valores de  $I_C$  e  $V_{CE}$  são, essencialmente, os mesmos.

- 9) Determine os valores de  $I_C$  e  $V_{CE}$  para o circuito abaixo usando as técnicas exata e aproximada e compare os resultados.



Antes de resolver vamos verificar se podemos ou não usar a análise por aproximação, ou seja

$$\beta R_E \geq 10 R_2 \Rightarrow 50 \cdot 1,5k \geq 10 \cdot 22k$$

$$\boxed{60k \leq 220k \Rightarrow \text{não satisfaz a condição.}}$$

Método exato:

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{82k \cdot 22k}{82k + 22k} = \boxed{17,35k\Omega}$$

$$E_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{22k}{82k + 22k} 18 = \boxed{3,81V}$$

$$I_B = \frac{E_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) R_E} = \frac{3,81 - 0,7}{17,35k + (50 + 1)1,2k} = \boxed{39,6\mu A}$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \cdot 39,6\mu = \boxed{1,98mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 18 - 1,98m(5,6k + 1,2k) = \boxed{4,54V}$$

Análise aproximada

$$V_B = E_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{22k}{82k + 22k} 18 = \boxed{3,81V}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 3,81 - 0,7 = \boxed{3,11V}$$

$$I_C \cong I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{3,11}{1,2k} = \boxed{2,59mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 18 - 2,59m(5,6k + 1,2k) = \boxed{3,88V}$$

Tabulando, temos uma boa diferença entre os resultados, mas que ainda podem ser considerados aceitáveis.

	$I_C$	$V_{CE}$
Exato	1,98mA	4,54V
Aproximado	2,59mA	3,88V

### A reta de carga e o ponto Q para o PDT.

Como visto anteriormente podemos descobrir o ponto de operação através do cálculo da corrente no coletor e da tensão entre o coletor e o emissor. Calculando a corrente de saturação:

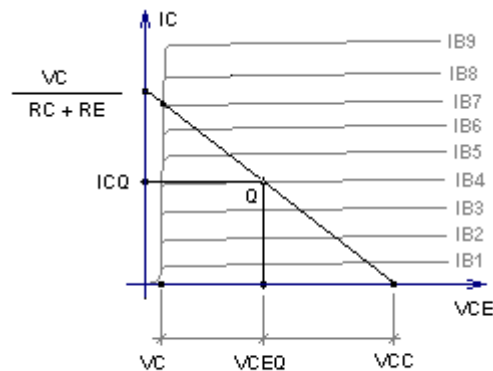
$$\left( I_{C(SAT)} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \right)$$

e a tensão de corte:

$$\left( V_{CE(CORTE)} = V_{CC} \right),$$



podemos plotar a reta de carga e sobre ela o ponto de operação, como visto na figura abaixo.



O ponto Q é virtualmente imune às variações no ganho de corrente. Uma maneira de mover o ponto Q sobre a reta é variando o resistor do emissor. Aumentando a resistência do emissor o ponto de operação desce sobre a reta de carga, aproximando do ponto de corte. Diminuindo a resistência do emissor, o ponto Q sobe sobre a reta de carga, aproximando-se do ponto de saturação. Muitos projetistas preferem ajustar o ponto de operação no centro da reta de carga para se ter uma maior estabilidade do circuito.

Para se calcular o ponto de operação devemos encontrar os valores da corrente no coletor e o valor da tensão entre o coletor e o emissor.

### Polarização com realimentação de tensão.

Fazendo esta nova polarização podemos ter um pouco mais de estabilidade do circuito. Essa realimentação pode ser vista no circuito abaixo:

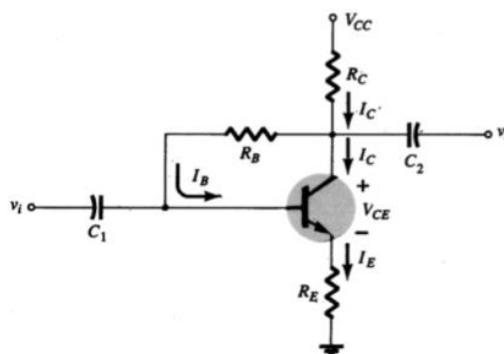


Fig. 4.34 Circuito de polarização dc com realimentação de tensão.

Faremos primeiro a malha base-emissor e com os resultados poderemos analisar a malha coletor-emissor.

**Malha base-emissor:**

Tomemos o circuito abaixo:

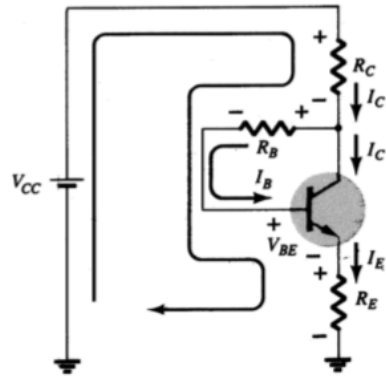


Fig. 4.35 Malha base-emissor para o circuito da Fig. 4.34.

Usando as regras de Kirchhoff para a malha indicada podemos escrever:

$$V_{CC} - I_C R_C - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

A corrente que passa pelo resistor do coletor não é  $I_C$  e sim:

$$I_C' = I_C + I_B$$

Mas como a corrente na base é muito menor que as correntes no coletor e no RC, podemos aproximar estas últimas correntes, e, portanto:

$$I_C' @ I_C = b I_B$$

$$I_E @ I_C$$

Então podemos reescrever a equação da malha da seguinte forma

$$V_{CC} - b I_B R_C - I_B R_B - V_{BE} - b I_B R_E = 0$$

$$V_{CC} - V_{BE} - b I_B (R_C + R_E) - I_B R_B = 0$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + I_B (R_C + R_E)}$$

### Malha coletor-emissor:

A malha coletor-emissor está mostrada na figura abaixo:

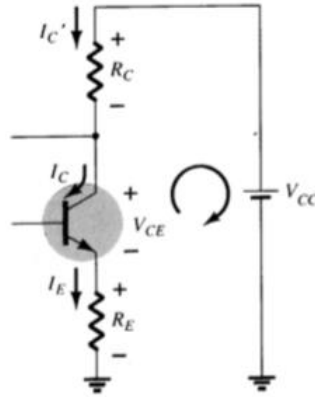


Fig. 4.36 Malha coletor-emissor para o circuito da Fig. 4.34.

Usando as regras de Kirchhoff novamente, temos:

$$I_E R_E + V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

Novamente:

$$I_C \approx I_C \text{ e } I_E \approx I_C$$

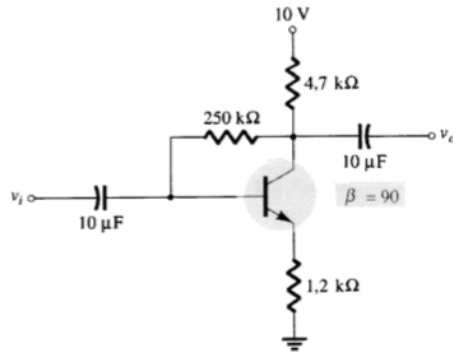
Então temos a tensão entre o coletor e o emissor:

$$I_C (R_C + R_E) + V_{CE} - V_{CC} = 0$$
$$\boxed{V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)}$$

Este resultado é exatamente igual aos resultados obtidos na polarização do emissor e do PDT.

### Exercícios

10) Determine  $I_C$  e  $V_{CE}$  para o circuito abaixo:



$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta (R_C + R_E)} = \frac{10 - 0,7}{250k + 90 \times (4,7k + 1,2k)}$$

$$I_B = 11,91mA$$

$$I_c = \beta I_B = 90 \times 11,91m$$

$$I_c = 1,07mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_c (R_C + R_E)$$

$$V_{CE} = 10 - 1,07m \times (4,7k + 1,2k)$$

$$V_{CE} = 3,69V$$

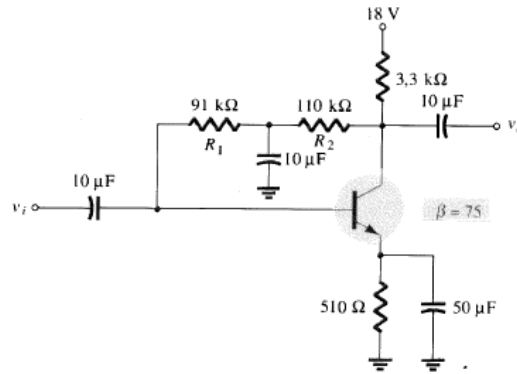
11) Repita o exercício 10 utilizando um beta de 135

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta (R_C + R_E)} = \frac{10 - 0,7}{250k + 135(4,7k + 1,2k)} = 8,89\mu A$$

$$I_c = \beta I_B = 135 \cdot 8,89\mu = 1,2mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_c (R_C + R_E) = 10 - 1,2m(4,7k + 1,2k) = 2,92V$$

12) Determine os valores dc de  $I_B$  e  $V_C$  para o circuito abaixo:



$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C + R_E)} = \frac{18 - 0,7}{(91k + 110k) + 75(3,3k + 0,51k)} = 35,5 \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 75 \cdot 35,5 \mu = \boxed{2,66 mA}$$

$$V_C = V_{CC} - I'_C (R_C) \cong V_{CC} - I'_C (R_C) = 18 - 2,26m(3,3k) = \boxed{9,22V}$$

### Configurações mistas de Polarização.

Há várias configurações de polarização de TBJ que não se enquadram nos modelos básicos analisados nas seções anteriores. No entanto tivemos um padrão que foi sempre de obter a corrente na base, uma vez conhecida a corrente de base, a corrente de coletor e os níveis de tensão do circuito de saída podem ser determinados diretamente.

Vamos analisar mais alguns tipos, por exemplo quando o resistor de emissor for retirado da configuração com realimentação de tensão do circuito abaixo. Faremos isso em exercícios.

### Exercício

13) Determine:  $I_C$ ,  $V_{CE}$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ ,  $V_E$  e  $V_{BC}$  para o circuito abaixo:

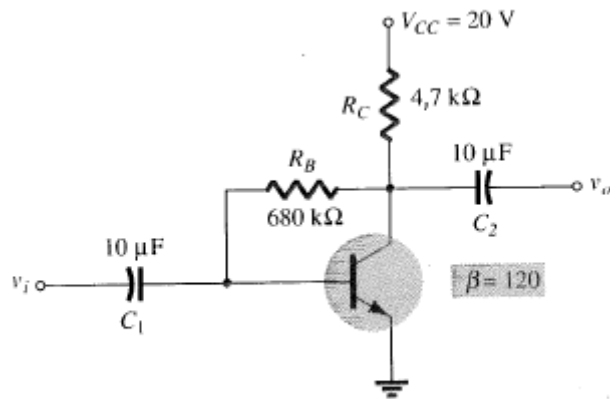


Fig. 4.39 Realimentação de coletor com  $R_E = 0\Omega$ .

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C)} = \frac{20 - 0,7}{(680k) + 120(4,7k)} = 15,51\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 120 \cdot 15,51\mu = \boxed{1,86mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C) = 20 - 1,86m(4,7k) = \boxed{11,26V}$$

$$V_B = V_{BE} = \boxed{0,7V}$$

$$V_C = V_{CE} = \boxed{11,26V}$$

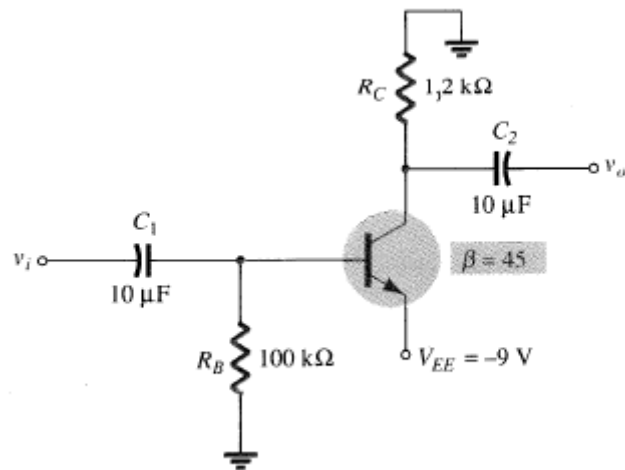
$$V_E = \boxed{0V}$$

$$V_{BC} = V_B - V_C = 0,7 - 11,26 = \boxed{-10,56V}$$

Outro exemplo é a aplicação diretamente da tensão dc ao terminal do emissor e o resistor de coletor conectado à terra.

### Exercício

14) Determine:  $V_B$  e  $V_C$  para o circuito abaixo:



Vamos usar a lei das malhas no sentido horário, para a malha base-emissor:

$$-IBR_B = V_{BE} + V_{EE} = 0$$

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_B} = \frac{9 - 0,7}{100k} = 83 \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 45 \cdot 83 \mu = 3,735 mA$$

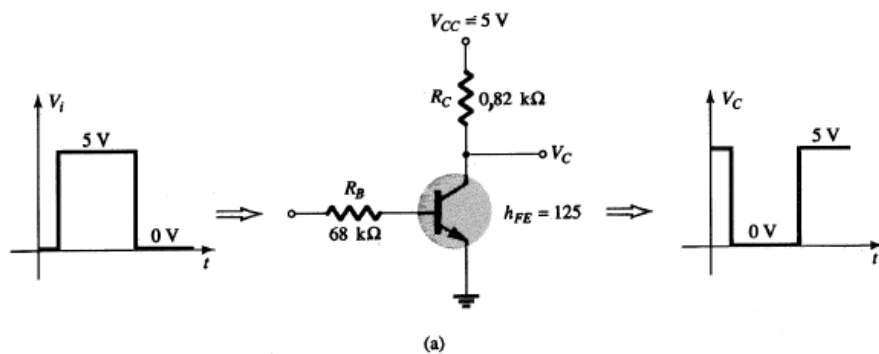
$$V_C = -I_C R_C = \boxed{-4,48V}$$

$$V_B = -I_B R_B = -83 \mu \cdot 100k = \boxed{-8,3V}$$

Outros tipos de configurações são mostrados no livro texto, para mais detalhes procure verificar essas outras configurações.

### Circuitos de chaveamento com transistor.

Além de fazer a amplificação de sinais, podemos usar o transistor como chave em computadores e aplicações de controle. Tomemos o circuito abaixo:



Ele pode ser usado como um inversor em um circuito de lógica computacional. Observe que a tensão de saída é oposta àquela aplicada na base ou terminal de entrada. A única fonte dc é conectada ao coletor, ou circuito de saída, para aplicações em computadores, é tipicamente igual à amplitude da porção “alta” do sinal aplicado – neste caso 5V.